

doi:10.3788/gzxb20154405.0523005

# 低压双液体变焦透镜的理论及工艺研究

魏茂炜, 彭润玲, 汤征洋, 陈家璧

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

**摘 要:**通过对仅有单层介电薄膜双液体变焦透镜模型的相关理论分析,得出介电层薄膜的厚度及均匀性对双液体变焦透镜的性能影响很大,并绘制了双液体变焦透镜焦距与驱动电压、介电层厚度的关系曲线。在此基础上,以降低双液体变焦透镜的驱动电压为目的,对介电层的选择进行了分析,选择既可充当介电层又可充当疏水层的派瑞林材料作为双液体变焦透镜的介电层材料,通过真空蒸发镀膜工艺得到了合适厚度的介电层派瑞林薄膜,并对所镀薄膜表面形貌以及厚度进行了测试。选择氯化钾以及溴代十二烷作为导电液体和油性液体,利用离心方式除去液体中溶有的气体,进而制作完成双液体变焦透镜样品。电驱变焦实验得到低压双液体变焦透镜样品的变焦范围为 $\pm 20$  mm,驱动电压约为 30 V,对于实验过程中出现的迟滞效应,通过对杨氏方程中引入摩擦力项,合理地解释了其原因。

**关键词:**双液体变焦透镜;低压;电驱变焦;介电层;派瑞林;真空蒸发;变焦迟滞

中图分类号:O439;O435.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)05-0523005-5

## Study on Theory and Technology of Low Voltage Variable-focus Double Liquid Lens

WEI Mao-wei, PENG Run-ling, TANG Zheng-yang, CHEN Jia-bi

(Shanghai Key Lab of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In this paper, theoretical analysis of the cylindrical double-liquid lens model with single-layer dielectric film, tells us that the thickness and uniformity of the dielectric film have great influence on the performance of variable-focus double liquid lens. The relation curve between focal length of liquid lens and driving voltage is drawn. On this basis, parylene is chosen as the dielectric film of low voltage variable-focus double liquid lens to reduce the driving voltage. The parylene film inside the cylindrical chamber with suitable thickness is coated by vacuum evaporation, and the surface appearance and the thickness of the film are also measured. In the experiment, the conducting liquid of potassium chloride and insulating liquid of silicone oil are chosen, with centrifugal degasification processing before used. At last, a sample of liquid lens is produced. The sample has excellent property with focal range  $\pm 20$  V under the maximum driving voltage 30 V. The friction term is introduced into Yong's equation and a reasonable explanation is given for the phenomenon of variable-focus hysteresis.

**Key words:** Double liquid variable-focus lens; Low voltage; Electric drive zoom; Dielectric film; parylene; Vacuum evaporation; Variable-focus hysteresis

**OCIS Codes:** 230.2093; 080.3630; 120.3620

## 0 引言

目前光电仪器日益趋向小型化和轻量化,原有的

通过机械方法改变透镜位置来实现对焦和变焦的方法已经不能满足目前的需要,随即出现了各种不同原理的无机械运动变焦透镜。基于电润湿效应<sup>[1]</sup>

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 11104184)、国家重点基础研究发展计划(No. 2011cb707504)、教育部博士点新教师类基金(No. 2011312012011)和上海市教育委员会创新项目(No. 12YZ108)资助

**第一作者:**魏茂炜(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为液体变焦透镜与光学设计。Email:wmwsust@163.com

**导师(通讯作者):**彭润玲(1978-),女,副教授,博士,主要研究方向为液体变焦透镜及信息光学。Email:pengrunling@gmail.com

**收稿日期:**2014-11-10; **录用日期:**2014-12-24

<http://www.photon.ac.cn>

(Electrowetting on Dielectric, EWOD) 的双液体变焦透镜以其突出的性能而越来越受到人们的重视, 这种透镜通过外加电压改变双液体界面曲率来实现变焦, 而且具有结构紧凑、价格低廉、响应速度快、寿命长和成像质量好等优点, 具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>.

随着对基于电润湿效应的双液体变焦透镜研究的深入, 人们发现驱动电压过高是目前亟需解决的问题. 为了有效降低双液体变焦透镜的驱动电压, 研究者们进行了大量的工作, 如 2001 年, Seyrat 和 Hayes<sup>[3]</sup> 使用  $1\ \mu\text{m}$  厚的无定型含氟聚合物 Teflon 作为介电质, 将电湿效应驱动电压降到 50 V, 但是接触角的变化范围仅为  $20^\circ$ ; Saeki<sup>[4]</sup> 等人将 Teflon 薄膜减小到 13 ns 后, 仅用 6 V 的电压就使接触角发生了改变. 但是这种简单通过降低薄膜厚度来减小驱动电压的方式是以薄膜容易过早被击穿而致使接触角范围过小为代价的. 另一种可以用来减小驱动电压的方法是采用介电常量较大的材料作为 EWOD 的介电层以降低驱动电压<sup>[5-8]</sup>, 并且在介电层外部涂覆一层疏水性能较好的疏水层以增加初始接触角, 但是介电层与疏水层的厚度关系对双液体变焦透镜的性能影响依然巨大, 而且工艺复杂, 不易形成均匀无针孔的双层薄膜. 故根据不同的变焦范围的需求, 可以采用合适的介电层厚度来使驱动电压降到最低, 那么厚度可控、膜层均匀无针孔的镀膜工艺是一个亟待解决的问题.

本文将从介电层薄膜厚度对双液体变焦透镜性能的影响、镀膜工艺等方面对双液体变焦透镜进行了研究, 理论上分析了介电层薄膜材料与厚度对双液体变焦透镜的影响, 实验上选择了合适的镀膜及测试工艺, 完成介电层薄膜的镀膜与检测, 并制作完成双液体变焦透镜样品.

## 1 低压双液体变焦透镜的理论分析

### 1.1 电润湿效应

电润湿效应是指通过改变液滴与镀有绝缘层(介电层)的导电基板之间电压, 来改变液滴在基板上的润湿性, 即改变导电液滴与基板之间的接触角, 使液滴面型发生形变的现象. 如图 1, 将一滴导电液体滴在镀有

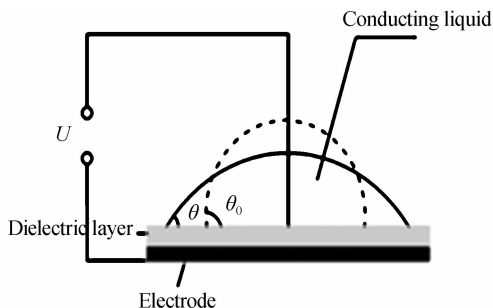


图 1 电润湿效应示意图

Fig. 1 Diagram of electrowetting effect

介电层的金属平板上, 当外加电压由零变为  $U$  时, 液体界面所呈现的面型由如图的虚线变为实线, 即液体与绝缘层之间的接触角由  $\theta_0$  变为  $\theta$ .

### 1.2 基于电润湿效应的双液体变焦透镜

双液体变焦透镜就是利用电润湿效应的原理通过外加电压来改变透镜的焦距<sup>[9-10]</sup>. 目前, 双液体变焦透镜有圆锥形、圆柱形等模型, 工作原理是完全相同的. 本文采用的双液体变焦透镜的模型为仅有单层介电薄膜的圆柱形双液体变焦透镜, 如图 2.

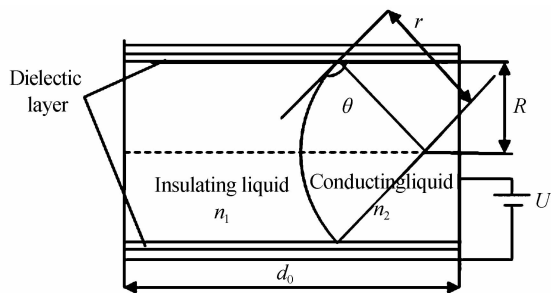


图 2 双液体变焦透镜的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of variable-focus double liquid lens

本文采用的是圆柱型铜管<sup>[11]</sup>, 在圆柱管内壁镀有一层介电层. 往圆柱管中注入两种透明且互不浸润的液体, 一种为绝缘的非极性液体, 另一种为导电的水溶液. 这两种液体的折射率不同, 但密度相同. 折射率不同是为了保证光束在液体界面处发生较大的折射, 可以实现透镜聚焦或发散的功能. 而密度相同可以保证两种液体界面在各个方位都不受重力影响, 从而使两种液体界面始终为完美的球形界面<sup>[12]</sup>. 在导电液体和电极之间施加电压, 介电层两边会积聚电荷, 积聚的电荷可以有效地改变导电液体与圆柱管内壁的界面张力, 从而改变液体与圆柱管内壁的接触角, 导致界面面型的变化, 最终实现变焦功能.

### 1.3 介电层影响双液体变焦透镜性能的理论分析

在图 2 中, 假设介质层的厚度为  $d$ , 介电层可以等效为一个电容, 假设其单位面积上的电容量为  $C$ , 则

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} \quad (1)$$

又因为双液体变焦透镜的焦距为<sup>[11]</sup>

$$f' = \frac{r}{n_2 - n_1} \quad (2)$$

式中  $r$  为双液体球形界面的曲率半径,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为绝缘液体、导电液体的折射率. 由 Lippmann-Young 方程<sup>[13-14]</sup> 可得双液体变焦透镜的接触角  $\theta$  与电压的关系为

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\gamma_{12}d} U^2 \quad (3)$$

式中  $\theta$  为未加电压时的接触角.

由图 2 中各个参量的几何关系得

$$r = \frac{R}{\sin(\theta - 90^\circ)} = -\frac{R}{\cos \theta} \quad (4)$$

式中  $R$  为圆柱管内半径, 综上可得

$$f' = \frac{1}{\frac{n_1 - n_2}{R} \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (n_1 - n_2)}{2Rd\gamma_{12}} U^2} \quad (5)$$

由式(1)可得, 当目标焦距一定时, 介电层厚度对驱动电压有决定性的作用. 从通过 MATLAB 仿真所得到的图 3 可以看出, 当介电层厚度越小, 透镜的驱动电压越低.

所以可以根据对双液体变焦透镜焦距的需要, 通过尽可能减小介电层薄膜的厚度来降低驱动电压.

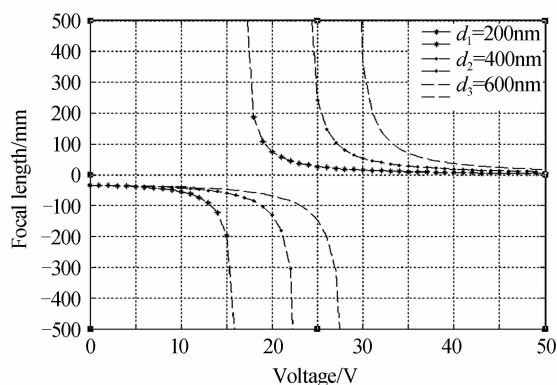


图 3 透镜焦距与驱动电压关系曲线

Fig. 3 Relation curve of lens focal length and driving voltage

又因为介电层的击穿电压为

$$U = Ed \quad (6)$$

$E$ 、 $d$  分别为介电层的电场强度、介电层的厚度. 由式(6)得, 介电层的击穿电压与介电层的厚度成正比, 所以如果为了降低驱动电压而不断减小介电层厚度, 最终会导致介电层容易被击穿. 所以, 可以根据目标焦距的变化范围, 选择合适的介电层及介电层厚度. 如果结构中存在气泡或者缺陷, 由于气体的介电常量是最小的, 气泡或缺陷将承受较大的电场强度而容易被击穿, 所以要求尽可能降低透镜的驱动电压, 并且要求介电层均匀无针孔.

## 2 低压双液体变焦透镜的工艺研究

### 2.1 介电层的选择

针对介电层的选择, 首先应该具有较大的介电常量以降低双液体变焦透镜的驱动电压; 其次要保证容器壁与导电液体有足够大的接触角, 才可以使透镜的初始焦距很大; 第三要有合适的镀膜工艺可以保证在圆管的内壁镀一层均匀且粗糙度较小的薄膜. 本文选择派瑞林(Parylene)作为介电层, Parylene 它可在真空下气相沉积, Parylene 活性分子的良好穿透力能在元件内部、底部、周围形成无针孔、厚度均匀的透明绝缘涂层; 而且其具有优异的疏水性能, 在空气中与液滴的接触角约为  $120^\circ$ , 因此本实验中 Parylene 不仅作为透

镜的介电层同时也充当了防水层.

### 2.2 介电层的涂覆工艺

本文采用的双液体变焦透镜的模型为仅有单层介电薄膜的圆柱形双液体变焦透镜. 外部电极采用圆柱型铜管(外径 8 mm, 内径 6 mm, 高度 6 mm), 然后在圆管内壁用真空蒸发镀膜的方法镀一层均匀无针孔的 Parylene 薄膜. 在此基础上制备双液体变焦透镜模型, 进行电驱变焦的实验.

该涂覆过程采用的是 DMJ-LV II 型 Parylene 等离子真空涂敷设备(如图 4), 本型号设备属立式 Parylene 真空涂敷设备, 并具有等离子预处理功能. 它是一种用于将 Parylene 用独特的真空气相沉积的工艺设备, 即形成由活性小分子在基材表面“生长”出完全敷形的聚合物薄膜涂层的专用设备.



图 4 DMJ-LV II 型 Parylene 等离子真空涂敷设备

Fig. 4 DMJ-LV II vacuum coating equipment

由于目前对于圆管内壁表面形貌的测试存在困难, 本文对平板镀膜所镀派瑞林的表面形貌以及厚度进行了 SEM 的测试, 测试结果如图 5. 派瑞林表面均匀无针孔, 粗糙度低, 并且可以通过控制真空蒸发镀膜时间进行控制薄膜的厚度, 所以派瑞林非常适合作为低压双液体变焦透镜的介电层.

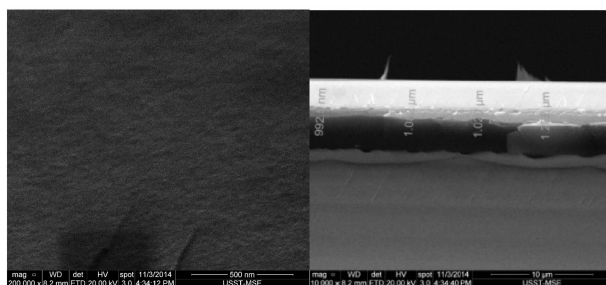


图 5 派瑞林薄膜表面形貌与厚度

Fig. 5 Surface appearance and thickness of parylene film

### 2.3 双液体变焦透镜的制作

#### 1) 准备工作

(a) 清洗 ITO 玻璃基片、玻璃基片: 用蘸有无水乙醇的无尘布擦拭干净;

(b) 配制密度为 1.038 2 g/mL 的氯化钾溶液;

(c) 氯化钾溶液与溴代十二烷除气: 在 3000 转每分钟的离心机中离心 12 min 以除去液体中溶有的气体;

(d) 配置封装用胶: 将得福康 5 min 环氧胶按 1:1

比例配制,搅拌均匀;

## 2) 制作样品

(a) 封装 ITO 玻璃基片:将镀好介电层的金属管固定,在其一个截面均匀涂覆封装胶少量,然后用夹具将带有导电电极的 ITO 玻璃片加压固定在金属管的截面上,固化时间约 2 h;

(b) 加入导电液体与油性液体:首先用移液管向管内加入 85 mm<sup>3</sup> 氯化钾溶液,然后再用移液管继续向管内加入 85 mm<sup>3</sup> 溴代十二烷;

(c) 封装玻璃基片:将加入液体的金属管固定,在其另一个截面均匀涂覆封装胶少量,然后用夹具玻璃片加压固定在金属管的截面上,固化时间约 2 h;

低压双液体变焦透镜样品制作完成,如图 6.

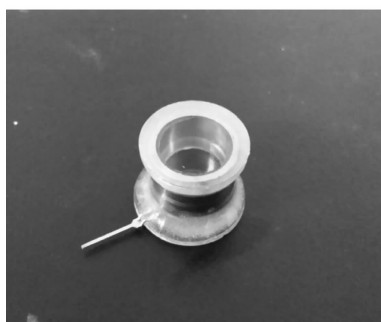


图 6 低压双液体变焦透镜样品

Fig. 6 Low voltage variable-focus double liquid lens sample

## 3 双液体变焦透镜的性能测试

对透镜样品进行加电压进行测试,实验测得的双液体变焦透镜的焦距随电压的变化曲线如图 7 所示,方形曲线为电压增加时焦距的变化曲线,圆形曲线为电压降低是焦距的变化曲线.该双液体变焦透镜的焦距变化范围约为±20 mm,驱动电压为 30 V,具有良好的可重复操作性.

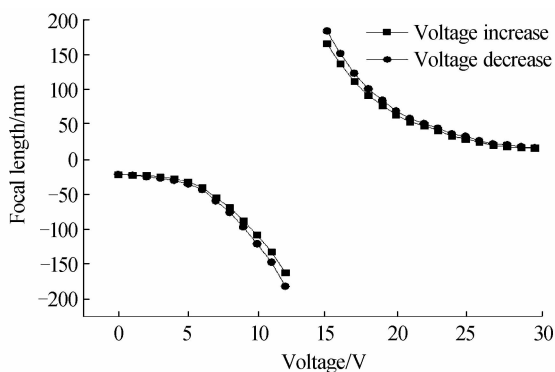


图 7 透镜样品焦距变化曲线

Fig. 7 The focal length curves of lens sample

但是通过数据发现,双液体变焦透镜存在明显的迟滞效应.由于液体与圆管内壁之间存在一定的与液滴运动趋势相反的摩擦力,所以杨氏方程会出现变化,即

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SL_1} - \gamma_{SL_2}}{\gamma_{L_1L_2}} + \frac{f}{\gamma_{L_1L_2}} \quad (7)$$

新的杨氏方程与原先的杨氏方程多了一个与摩擦力相关的项<sup>[15]</sup>,该摩擦力的在当电压增大时,阻滞接触角的减小;当电压减小时,阻滞接触角的增大.所以导致迟滞效应的出现,电压增大与电压减小时的焦距曲线会出现一定的差值.  $f$  值的大小与圆管内壁介电层的粗糙度有直接的关系,所以减小粗糙度的大小可以减小迟滞效应.

## 4 结论

本文先从理论的角度分析了介电层材料与厚度对双液体变焦透镜驱动电压的影响.得出可以根据目标焦距的需要,通过选择合适介电层厚度来降低双液体变焦透镜的驱动电压,并且防止介电层因电压过高而被击穿.在此基础上,对介电层的选择进行了分析,选择既可充当介电层又可充当防水层的派瑞林材料作为双液体变焦透镜的介电层材料.通过真空蒸发镀膜工艺得到了合适厚度的介电层派瑞林薄膜,并对薄膜表面形貌以及厚度进行了测试.选择氯化钾以及溴代十二烷作为导电液体和油性液体,利用离心方式除去液体中溶有的气体,制作完成双液体变焦透镜样品.电驱变焦实验得到透镜的变焦范围为±20 mm,驱动电压为 30 V.但是透镜样品存在明显的迟滞响应,怎样减小透镜的迟滞效应是接下来研究的重点.

### 参考文献

- [1] ZHANG Zhen-xian, WANG Ke-yi, YAO Hai-tao *et al.* Study on curing control and focal spot measurement of aspherical liquid microlens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (11): 3212-3216.  
詹珍贤,王克逸,姚海涛,等. 非球面液滴微透镜固化控制和焦距测量研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3212-3216.
- [2] ZHU Cheng, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi. Double-liquid lens based on electrowetting[J]. *College Physics*, 2007, **16** (6): 57-62.  
祝澄,彭润玲,陈家璧. 基于电润湿效应的双液体透镜[J]. *大学物理*, 2007, **16**(6): 57-62.
- [3] EMILIE SEYRAT, ROBERT A. HAYES. Amorphous fluoropolymers as insulators for reversible low-voltage [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **50**(3): 1383-1386.
- [4] SAEKI F, BAUM J, MOON H, *et al.* Electrowetting on dielectrics: Reducing voltage requirements for microfluidics [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2001, **85**: 12-13.
- [5] MOON H, CHO S, GARRELL R, *et al.* Low voltage electrowetting-on-dielectric[J]. *Applied Physics*, 2002, **92** (7): 4080-4087.
- [6] KIM N Y, HONG S M, PARK S S, *et al.* The movement of micro droplet with the effects of dielectric layer and hydrophobic surface treatment with R. F. atmospheric plasma in EWOD structure [J]. *Institute of Physics Conference Series*, 2006, **34**: 650-655.
- [7] SYLVANUS N. WOSU. Anodic oxidation of tantalum in water and biological solutions using current limiting constant

- voltage method[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, **42**: 4087-4097.
- [8] LIN Yan-You, EVANS R D, WELCH E, *et al.* Low voltage electrowetting-on-dielectric platform using multi-layer insulators[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, **150**: 465-470.
- [9] WALKER S W, SHAPIRO B. Modeling the fluid dynamics of electrowetting on dielectric (EWOD) [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, **15**(4): 986-1000.
- [10] BERGE B, PESEUX J. Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting[J]. *The European Physical Journal E*, 2000, **3**: 159-163.
- [11] SHENG Jin-xia, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi. Analysis on property of double-liquid variable-focus lens based on electrowetting[J]. *Optics Instrument*, 2007, **19**(4): 23-26.
- [12] PENG Run-ling, HU Zhi-wei, CHEN Jia-bi, *et al.* The interface shape of the double-liquid lens[J]. *Optik*, 2013, **124**(19): 3848-3850.
- [13] 腾新荣. 表面物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 4.
- [14] KUIPER S, HENDRIKS B-H-W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(7): 1128-1130.
- [15] WANG Da-zhen, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi, *et al.* Variable-focus hysteresis of double-liquid variable-focus lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **32**(6): 87-9.